

Impactos, extensão e proposta de mitigação da intrusão salina no Rio São Mateus, Espírito Santo

Aloísio José Bueno COTTA¹ & Honerio Coutinho de JESUS²

¹ Departamento de Ciências Naturais, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo. Rod. Governador Mário Covas, Km 60, Litorâneo, CEP 29.932-540, São Mateus, ES, Brasil (aloisio.cotta@ufes.br).

² Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal do Espírito Santo. Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, CEP 29.075-910, Vitória, ES, Brasil (honerio.jesus@ufes.br).

Resumo. O Rio São Mateus (RSM) é a principal fonte de abastecimento da cidade de São Mateus, Espírito Santo. A elevada demanda pelos recursos hídricos, combinada com a baixa pluviosidade dos últimos anos, fizeram com que a vazão do rio fosse significativamente reduzida, o que permitiu o avanço atípico da intrusão salina (IS) pelo estuário do RSM. Este estudo visou dimensionar a extensão espacial e temporal do processo, a fim de auxiliar na mitigação do problema. A salinidade, temperatura, pH, oxigênio dissolvido e turbidez da água foram medidos entre 2016 e 2020 em diversos pontos. Verificou-se que, nos períodos de seca, a IS avança por mais de 50 km a partir da foz, o que compromete o abastecimento público dada à captação de água salgada, com excessivo teor de cloreto (ultrapassando 10.000 mg/L). As variações das descargas do RSM, seu impacto sobre a qualidade da água captada, e sobre o avanço (e retração) da IS permitem propor que a manutenção de vazões de 10 m³/s são suficientes para manter a intrusão a jusante da cidade, o que permite a captação de água livre dos efeitos da salinização. O estudo também revelou que devido à baixa estratificação da água no estuário, morfologia da calha e baixa descarga fluvial, a contenção da IS por uma barreira subaquática não é viável, nem a mitigação do problema com a instalação de uma nova captação à montante da IS. A regularização da vazão do rio ($Q_{reg} \geq 10 \text{ m}^3/\text{s}$), aproveitando o excedente hídrico do período chuvoso, é sugerida como a melhor alternativa para conter o avanço da IS. A construção de um reservatório com 173 hm³ no RSM é proposta como forma de regularizar a descarga do rio nos meses de seca e, assim evitar o comprometimento do abastecimento público. Tal proposta está em linha com as recomendações do Plano Estadual de Recursos Hídricos para melhorar o abastecimento municipal e agrícola por meio de investimentos em infraestrutura para reserva hídrica.

Palavras-chave. Salinização, abastecimento público, cloreto, reservatório, regularização de vazão.

Abstract. IMPACTS, EXTENT AND MITIGATION OF THE SALINE INTRUSION IN THE SÃO MATEUS RIVER, ES. The São Mateus River (SMR) is the main source of supply for São Mateus, Espírito Santo. The high demand for water resources, combined with the low rainfall in recent years, meant that the river's flow was significantly reduced, which allowed an atypical advance of the saline intrusion (SI) through the SMR estuary. This study aimed to measure the spatial and temporal extent of the process to mitigate the problem. Water salinity, temperature, pH, dissolved oxygen and turbidity were measured between 2016 and 2020 at several points. It was found that, in drought periods, the SI advances farther than 50 km from the river mouth, which compromises the public supply, given the capture of saltwater and an excessive chloride content (exceeding 10,000 mg/L). The variations of the SMR discharges, its impact on the water's captured quality and the advance (and retraction) of the SI allows proposing that the maintenance of flows of 10 m³/s are sufficient to maintain the intrusion downstream of the city, the that allows the capture of water free from the effects of salinization. The study also revealed that due to the low stratification of water in the estuary, gutter morphology, and low fluvial discharge, the containment of the IS by an underwater barrier is not feasible, installing a new abstraction upstream of the SI. The regularization of the river flow ($Q_{reg} \geq 10 \text{ m}^3/\text{s}$), taking advantage of the water surplus in the rainy season, is suggested as the best alternative to contain the SI's advance. The construction of a reservoir with 173 hm³ in the RSM is proposed to regularize the discharge of the river in the dry

months and, thus, avoid the compromise of public supply. This proposal is in line with the State Water Resources Plan's recommendations to improve municipal and agricultural supply through investments in water reservoir infrastructure.

Keywords. Salinization, public supply, chloride, water reservoir, flow regulation.

1 Introdução

A água é elemento essencial para a manutenção da vida e para o desenvolvimento socioeconômico. Os estuários são ambientes reconhecidamente vulneráveis e complexos, principalmente graças ao fluxo bidirecional de suas águas, nos quais a intrusão salina (IS) é um fenômeno comum (Alber, 2002; Cañedo-Argüelles *et al.*, 2013; Werner *et al.*, 2013). A extensão e a duração da IS na calha de um rio dependem de sua descarga de água doce, da amplitude das marés, da conformação da foz (principalmente da profundidade e largura), e tem como principal consequência o aumento da salinidade no trecho afetado (Ippen & Harleman, 1961; Savenije, 1989; Savenije, 2012).

Dalmas *et al.* (2020) destacam que a IS é agravada pela elevação do nível do mar e pela ocorrência de estiagens induzidas pelas mudanças climáticas globais. A IS reduz a disponibilidade de água doce nas regiões costeiras, já que a presença de apenas 1% de água marinha é suficiente para tornar a água imprópria para consumo, uma vez que a concentração de cloretos na mistura supera o padrão de potabilidade de 250 mg/L da Portaria 2.914 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011). Fatores como a captação e retenção da água em reservatórios, bem como a dragagem do canal e alargamento da foz contribuem para um maior avanço da IS (Savenije, 2012; Mikhailova 2013; Gisen *et al.*, 2015a). Por outro lado, o aumento da descarga nos períodos de seca promovida pela regularização da vazão (Q) de rios e a construção de barreiras subaquáticas são eficientes na sua contenção (Yobbi & Knochenmus, 1989; Fagerburg & Alexander, 1994). O efeito da regularização foi demonstrado por Genz *et al.* (2008), os quais constataram que a manutenção de uma $Q_{\text{média}}$ de 11 m³/s é suficiente para conter a IS no Rio Paraguaçu (BA) e preservar o zoneamento do estuário.

O avanço atípico da IS perturba a biota dulcícola e a cobertura vegetal, promove o assoreamento de canais de navegação, impede o desenvolvimento de atividades agrícolas, a dessedentação animal e o abastecimento público (WRI, 2003; Medeiros, 2016; Sebastian, *et al.*, 2016; Xu, *et al.*, 2019). Por isso, a IS é uma ameaça para todas as pessoas que vivem nos estuários e suas proximidades (Gisen *et al.*, 2015b). Além disso, a cunha de água salgada (mais densa), que se forma no fundo da calha do rio, atua como uma barreira geoquímica que impede o transporte de efluentes e causa seu acúmulo nos sedimentos (Civita, 2012).

A intrusão da água marinha é mais severa durante os períodos de seca, quando há escassez de água doce nos rios (Manique *et al.*, 2011; Sebastian *et al.*, 2016). Por exemplo, entre 2015 a 2017 o abastecimento público de Piaçabuçu (AL) e Brejo Grande (SE), na foz do rio São Francisco, foi comprometido pelo avanço da IS quando a descarga do reservatório de Sobradinho (BA) foi reduzida de 2.900 para 700 m³/s (IBGE, 2018; Fonseca *et al.*, 2020).

Apesar da gravidade de suas consequências, a IS é um fenômeno ainda pouco estudado nos estuários brasileiros. Um melhor dimensionamento de sua extensão e dos impactos associados se faz necessário para preservar os recursos hídricos e o ecossistema estuarino (Mikhailov & Mikhailova, 2012).

A região norte do Espírito Santo (ES) é periodicamente afetada por secas prolongadas devido a irregularidade do regime de chuvas (Alvalá *et al.*, 2019; Favero *et al.*, 2021), o que em conjunto com as altas taxas de evapotranspiração reduz a vazão de seus rios, e a descarga fluvial nos estuários (Molisani *et al.*, 2006; Marengo *et al.*, 2017). Segundo Puppini *et al.* (2019), a região norte apresenta a menor disponibilidade hídrica do estado e grande dificuldade para atender às demandas agropecuária e urbana. O que têm gerado conflitos pela água (Loss *et al.*, 2019), em

oposição a Política Estadual de Recursos Hídricos que prevê sua gestão e uso compartilhados (Espírito Santo, 2014).

O Rio São Mateus (RSM) é o principal manancial de abastecimento para os mais de 130 mil habitantes da cidade de São Mateus, Espírito Santo, (IBGE, 2019; Cotta *et al.*, 2020). Em seu baixo curso (entre a foz e a cidade,) o rio caracteriza-se pela ocorrência de processos flúvio-marinhos que permitem o avanço da IS, uma vez que seu estuário está sujeito às marés oceânicas (Vale & Ross, 2011).

Segundo o Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de São Mateus a IS é agravada durante a maré cheia e em períodos de estiagem severa, como ocorrido entre 2015 e 2017, com índices pluviométricos de 25 a 50% inferiores à média histórica (Ramos *et al.*, 2016; Alvalá *et al.*, 2019). Tal fato implicou numa significativa redução na vazão do RSM, ao ponto de inviabilizar a captação para abastecimento público devido ao avanço da IS até o ponto da captação municipal (Rede Gazeta, 2017). O que levou ao racionamento no abastecimento e à decertação de estado de calamidade pública (Decreto Nº 8.839, 2017). A crise hídrica do período também fez com que a irrigação fosse proibida em toda a bacia hidrográfica (ANA, 2016), com grandes perdas para o setor agropecuário (Galeano *et al.*, 2016). O abastecimento municipal foi novamente comprometido em 2020 (Decreto Nº 11.806, 2020).

Considerando os sérios impactos causados pela IS no RSM e a ausência de estudos sobre o processo, este trabalho concentrou-se no monitoramento da intrusão, durante os períodos de seca de 2016, 2017 e 2020, para dimensionar a extensão espacial e temporal do processo, bem como avaliar o impacto sobre a qualidade da água captada para abastecimento municipal, com vistas à formulação de estratégias para sua mitigação. A capacidade do modelo unidimensional de representação da IS, originalmente desenvolvido e aplicado em outros estuários (Savenije, 2012; Gisen *et al.*, 2015a, 2015b), também foi testada e empregada para estimar a descarga fluvial no estuário do RSM.

2 Área do estudo, material e métodos

2.1 Área de estudo

O Norte do ES apresenta clima tropical quente e úmido, Aw (Alvarez *et al.*, 2014), com temperatura média anual de 23,8 °C, índices de precipitação e evapotranspiração de 1.150 e 900 mm/ano, respectivamente, com 60% das chuvas concentradas entre outubro e março (Xavier *et al.*, 2015). Devido à irregularidade nos volumes anuais de precipitação a região é classificada como suscetível a secas severas (Uliana *et al.*, 2017).

A bacia hidrográfica do RSM (Fig. 1) possui 13,5 mil km², com 61% de sua área no ES. Segundo Elesbon *et al.* (2011), a bacia é caracterizada pela baixa densidade de drenagem e de confluências, respectivamente 0,37 km/km² e 0,068 km⁻². O rio principal é formado pelos braços Norte e Sul, respectivamente, o Rio Cotaxé com 244 km de extensão, e o Cricaré de 188 km, cujas nascentes em Minas Gerais estão a cerca de 1000 m de altitude. A confluência dos braços ocorre no baixo curso da bacia, onde passa a se chamar Rio São Mateus. Em seus braços, ou em seu curso principal, o rio não possui barragens para regularização de vazão (ANA, 2010), apesar de propostas já terem sido formuladas (Acquatool, 2009).

A principal interferência antrópica nestes cursos d'água decorre da captação de água para abastecimento público e da construção de mais de 2.900 pequenos reservatórios para irrigação (AGERH, 2018a) com outorgas totalizando 23 m³/s (Puppin *et al.*, 2019; ANA, 2020). A elevada demanda ultrapassa 50% da disponibilidade hídrica da bacia (Novais *et al.* 2019). O sistema de captação municipal para abastecimento de São Mateus está instalado a cerca de 40 km da foz, próximo à sede municipal (Fig. 1).

A sub-bacia do Rio Preto do Sul, com 291,5 km², tem ampla ocupação agrícola e dezenas de pequenos reservatórios para armazenar água para irrigação, ao ponto, deste curso apenas desaguar no rio principal nos períodos com intensa precipitação (Favero *et al.*, 2021). O córrego Bamburral (109 km²) e o Rio Mariricu

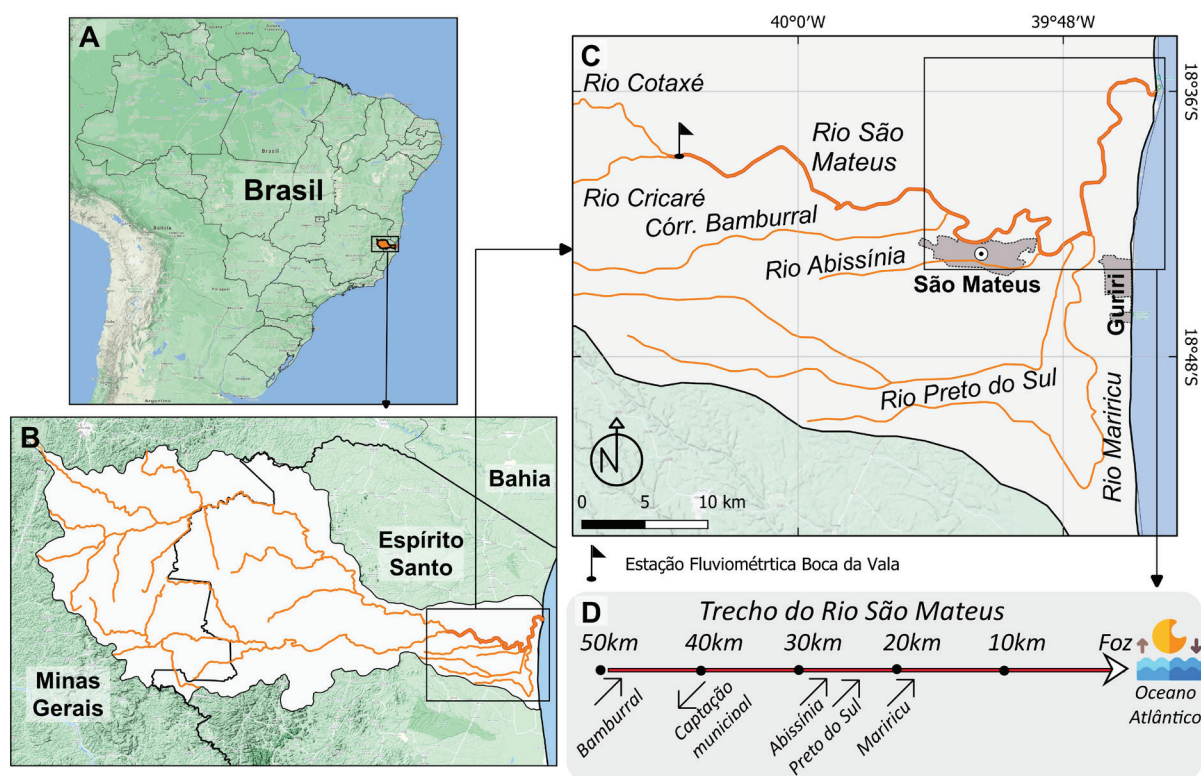


Figura 1. Área de estudo. A) Localização da Bacia hidrográfica do RSM. B) Destaque do baixo curso do rio. C) Destaque para captação municipal e principais cursos d'água do trecho próximo à cidade de São Mateus (ES). D) Indicação dos afluentes e captação em representação linear do RSM a partir da foz.

Figure 1. Study area. A) Location of the São Mateus River (SMR) hydrographic basin. B) Highlight the lower course of the river. C) Emphasis on municipal intake and main watercourses in the stretch close to the city of São Mateus (ES). D) Indication of tributaries and water abstraction in the linear representation of the RSM from the mouth.

também pouco contribuem para a descarga do RSM em decorrência do grande número de barramentos, sendo o segundo um rio de águas salobras devido a uma intercomunicação artificial com o mar em seu trecho mais ao sul. O Rio Abissínia recebe a maior parte dos efluentes domésticos do município, o que representa cerca de 70% de sua descarga no RSM (Cotta *et al.*, 2017), a 25 km da foz. Além disso, o Rio Abissínia também concentra grande parte da drenagem pluvial da cidade e, por isso, apresenta picos de vazão proporcionais à intensidade das chuvas. A proposta de enquadramento para estes cursos d'água os distribui entre as classes 1 e 4 (AGERH, 2019).

O estuário do RSM apresenta regime micromareal, com médias entre 0,5 a 1,8 m, e máximas em torno de 2,0 m (Silva *et al.*, 2005; Vale & Ross, 2011). Na porção superior do estuário, isto é, junto a cidade (a cerca de 40 km da foz) o efeito das marés apresenta um atraso de cerca de 3,5 h.

2.2 Obtenção e processamento de dados

Os registros da estação fluviométrica Boca da Vala (de 01/09/1974 a 23/12/2020), instalada após confluência dos rios Cricaré e Cotaxé, a 75 km da foz (Fig. 1), foram obtidos no site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), e processados no software SisCaH 1.0 (Sistema Computacional para Análises Hidrológicas), conforme Tormentino *et al.* (2009). Pequenas falhas na série diária de vazões foram completadas por interpolação linear.

Além dos registros da estação Boca da Vala, os dados das estações fluviométricas dos braços norte (55800005 - Fazenda São Mateus e 55850000 - São João Da Cachoeira Grande) e sul (55884990 - Jusante Barra do Ariranha, 55900000 - Barra de São Francisco e 55920000 - Córrego da Boa Esperança) do RSM foram usados para regionalização da vazão média com o software SisCoRV 1.0, pelo método tradicional com a área de drenagem como variável independente

(ANA, 2013). O modelo potencial apresentou o melhor ajuste aos dados ($R^2 = 0,97$ e teste T para intercepto e variável com $P < 0,001$) e gerou a função: $Q_{\text{média}} = 0,00730 \times A^{0,9784}$, com A em km². As médias mensais das 6 estações e coeficientes de ajuste da função de regionalização são apresentados no MATERIAL SUPLEMENTAR.

O SisCaH 1.0 foi também utilizado para estimar o volume de reservatório capaz de manter uma determinada vazão regularizada (Q_{reg}), conforme a metodologia de "diferenças acumuladas" entre as vazões afluentes e as vazões regularizadas (Tucci, 2012; Paiva & Paiva, 2016). As vazões afluentes foram calculadas ponderando-se os registros da estação Boca da Vala e a vazão média estimada com a função de regionalização para uma área de contribuição do reservatório de 12.084 km² ($Q_{\text{média}} = 72,0$ m³/s), frente a vazão média da estação Boca da Vala ($Q_{\text{média}} = 71,4$ m³/s), com área de drenagem 11.973 km². O fator de correção $72,0/71,4 = 1,009$ implica num aumento de apenas 0,9% nas vazões registradas pela estação. No presente estudo, a determinação do volume de armazenamento objetivou garantir uma Q_{reg} suficiente para impedir o avanço da IS até o ponto da captação municipal. O local da barragem foi escolhido ao considerar a proximidade com a cidade de São Mateus e a identificação de um ponto estreito na calha do rio.

Os mapas de localização e cálculos de áreas alagadas, para diferentes cotas de inundação pelo reservatório, foram produzidos com o software QGIS (QGIS.org 2021) utilizando o modelo digital de elevação (MDE) disponível no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA, 2020).

2.3 Trabalho de campo e modelagem da intrusão salina

O monitoramento da IS foi realizado durante o período seco (abril a agosto/2016, setembro/2017 e outubro/2020) com o registro de perfis verticais (de 20 cm a 11 m) da condutividade elétrica (CE), salinidade, pH, temperatura, oxigênio dissolvido (OD) e turbidez da água com um analisador multiparâmetros (modelo U-10, Horiba, Japão). A profundidade

da porção central da calha foi medida com trena em diferentes pontos ao longo do rio (Figura 2). Os dados das campanhas foram utilizados para compor um perfil longitudinal das profundidades médias a partir da foz.

As campanhas foram realizadas com embarcação motorizada, percorrendo o trecho entre os quilômetros 20 e 55 do rio, no dia de maré máxima (sizígia) durante os momentos de "estofa de preamar", isto é, nos intervalos com águas paradas após a maré alta (*High Water Slack-HWS*). O que permitiu registrar a máxima extensão da IS. Na campanha de setembro de 2017 o monitoramento foi realizado tanto no HWS, quanto na "estofa de baixa-mar", no momento de água paradas após a maré vazante (*Low Water Slack-LWS*), incluindo medidas na foz. Na figura 3 são apresentados os coeficientes de maré do mês de abril/2016, e sua variação na sizígia do dia 07/04/2016, com destaque para os HWS em 14:53h, considerado para realização da primeira campanha de monitoramento.

Os perfis de salinidade foram processados no programa Surfer™ (Golden Software, 1995) para gerar os mapas de contorno por krigagem com 50x20 linhas horizontais. O modelo unidimensional (1-D) de IS foi ajustado aos dados registrados durante o HWS e LWS, com as planilhas eletrônicas desenvolvidas Gisen *et al.* (2015a).

Os estudos de IS, geralmente, são divididos em duas partes: (i) tipificação da estratificação entre a água marina e a doce, e (ii) avaliação do alcance da intrusão. A estratificação foi avaliada com o parâmetro σ_t , em que σ_t é a variação vertical da salinidade e σ_s a salinidade média entre o topo e fundo da coluna de água (Officer, 1973). A estratificação é fraca (estuário do tipo I), com o sistema bem misturado quando $\sigma_t < 0,1$; moderada para (tipo II); e forte quando (tipo III).

Segundo Mikhailova (2013) para estuários dos tipos I ou II, com fraca estratificação (como será demonstrado para o RSM), o modelo unidimensional oferece uma boa representação da IS, uma vez que os efeitos da estratificação podem ser desprezados. As considerações teóricas e aspectos práticos da aplicação deste modelo são apresentadas em Savenije (2012), Zyryanov *et al.* (2015), Gisen *et al.* (2015a, 2015b)

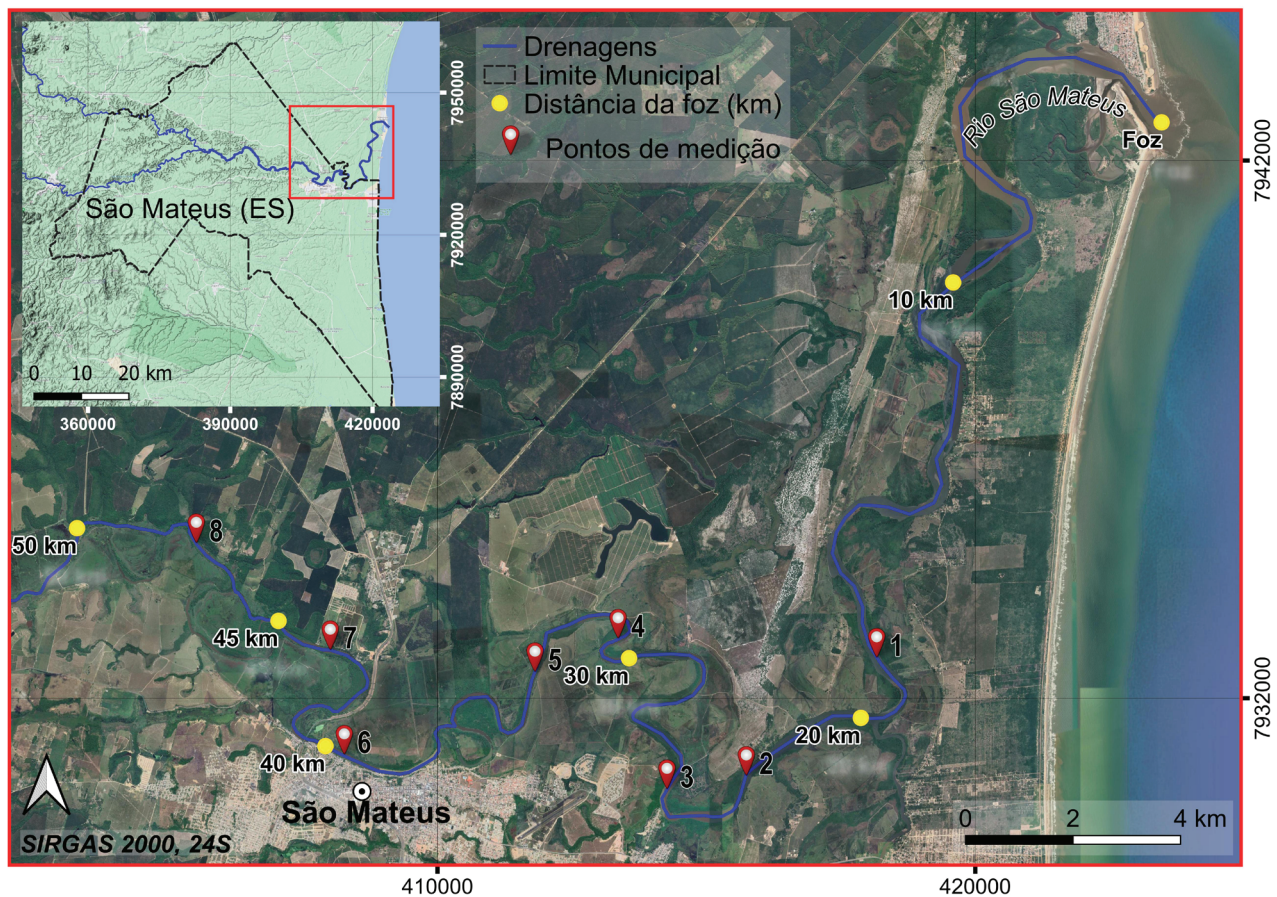


Figura 2. Trecho do RSM percorrido nas campanhas de monitoramento. As marcações em amarelo indicam a distância em relação a sua foz. Os pontos em vermelho (1 a 8) representam os pontos de medição da campanha de abril/2016. A captação municipal está instalada perto da marcação de 40 km (ponto 6).

Figure 2. The stretch of the SMR covered in the campaigns. The yellow markings indicate the distance from the river mouth. The red dots (1 to 8) represent the measurement points of the April of 2016 campaign. The municipal water abstraction system is installed near the 40 km mark (point number 6).

e Mikhailova (2013), no qual a extensão da intrusão para condições estacionárias é dada pela equação 1.

$$L_s = (S_s/S_r)(BhD/Q) \quad (\text{Eq. 1})$$

S_s e S_r referem-se às salinidades da água marinha e do rio, em um trecho com largura (B) e profundidade (h). Admite-se que a vazão (Q) e o coeficiente de dispersão longitudinal (D) são independentes da posição. Para contornar o problema de que antes do ajuste do modelo o valor da vazão ainda não é conhecido, uma nova variável (α) é introduzida, equação 2. O comportamento de α é função da posição (x) ao longo do rio, equação 3, em que K é o coeficiente de Van der Burgh, A é a área da seção transversal, b uma constante e o índice α_0 uma constante característica da foz (Savenije, 2012).

$$\alpha = D/Q \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\alpha = \alpha_0 + (K/A_0b)^{-bx-1} \quad (\text{Eq. 3})$$

O ajuste do modelo 1-D objetivou estimar a descarga de água doce do rio no estuário. O que é de difícil medição, uma vez que as estações de monitoramento são instaladas à montante dos trechos afetados pelas marés. Tal distanciamento, não permite assumir que a vazão registrada pela estação equivalha à descarga fluvial efetiva na foz. Além disso, as perdas por evaporação e em captações comprometem a aproximação (Miranda *et al.*, 2002). Um modelo que correlaciona a descarga de água doce nos estuários e seu efeito sobre as ondas de maré e a IS foi apresentado por Cai *et al.* (2014).

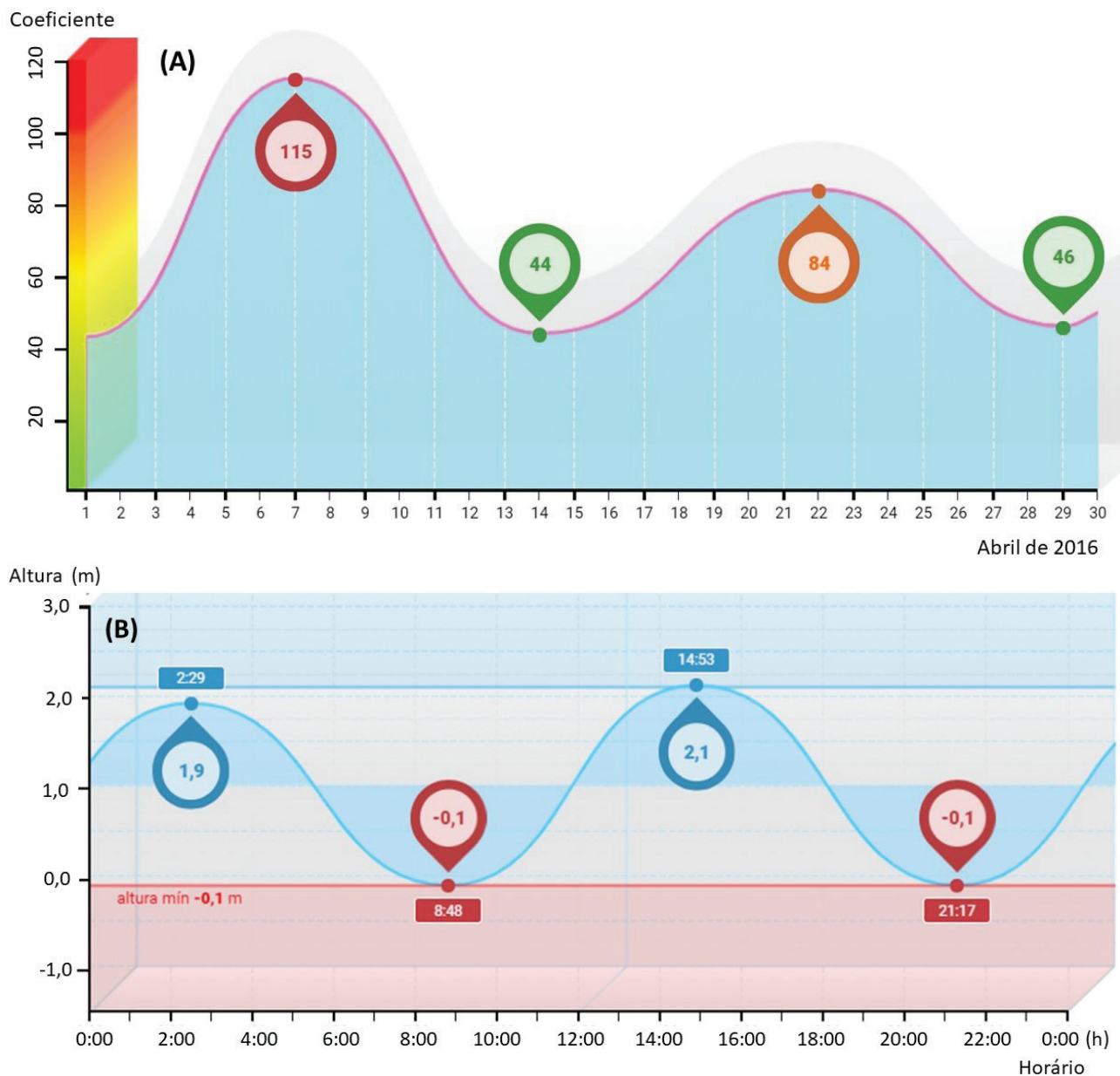


Figura 3. Marés no litoral de São Mateus. A) Coeficientes de abril/2016. B) Nível da água em 07/04/2016 (Tabua de Marés, 2016).

Figure 3. Tides on the coast of São Mateus. A) Coefficients for April of 2016. B) The water level on 04/07/2016 (Tabua de Marés, 2016).

A aplicação do modelo envolve uma primeira etapa de representação da morfologia, a partir dos dados de profundidade e largura obtidos em diferentes pontos ao longo da calha do rio. Na sequência a curva chave do modelo é ajustada aos dados de salinidade ao variar os valores de k e α_0 , com verificação gráfica da qualidade do ajuste entre as curvas teóricas e os dados registrados durante o HWS e LWS. Gisen *et al.* (2015a) sugerem iniciar a calibração do modelo com $k=0,7$ e variar o α_0 de modo a ajustar a curva do modelo à salinidade registrada. Depois o k é ajustado e o procedimento repetido

até se obter a melhor sobreposição. No presente estudo, a qualidade do ajuste foi avaliada com a raiz do erro quadrático médio normalizado (REQMn em %).

Segundo Vale e Ross (2011) o estuário do RSM foi profundamente alterado nas últimas décadas devido as mudanças no regime de transporte de sedimentos e morte dos mangues decorrentes do desmatamento e degradação dos solos na bacia. Atualmente a foz do rio possui 880 m de largura, com uma gradual redução para 48 m no trecho a 50 km da foz (Fig. 2).

3 Resultados e discussão

3.1 Vazões médias do Rio São Mateus (RSM)

O processamento dos dados da estação fluviométrica, Boca da Vala (Fig. 1), a qual concentra as drenagens de 89% da área da bacia, revelou que o RSM apresenta vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de recorrência ($Q_{7,10}$), vazão mínima esperada em 95 e 50% do tempo (Q_{95} e Q_{50}) e vazão média de longa permanência (Q_{mlp}) de 3,5, 6,7, 46,0 e 71,4 m^3/s , respectivamente, com máxima registrada (06/02/79) de 1.219 m^3/s e vazão específica (Q_s) de 6,0 $L/(km^2.s)$. Na média, a sazonalidade natural do rio concentra 32% da descarga em dezembro e janeiro, e apenas 11% no trimestre seco crítico entre agosto e outubro. As médias mensais e a curva de permanência são apresentadas no MATERIAL SUPLEMENTAR. No intervalo 2015-2020 a vazão média de apenas 46% da Q_{mlp} , devido ao baixo volume de chuvas na bacia. O que trouxe sérios problemas para o abastecimento público, devido à maior extensão da IS nos períodos de seca.

3.2 Avanço da IS e comprometimento da captação

A CE da água (média do perfil vertical) registrada ao longo do RSM é apresentada na Figura 4A. Na primeira campanha (07/04/2016) a água com alta salinidade, formada pela mistura de água marinha e do rio, estendia-se por cerca de 25 km a partir da foz. Porém, ainda sem alcançar a captação municipal, uma vez que a vazão do rio ($Q \approx 10 m^3/s$) no início do mês ainda era capaz de conter a IS a jusante da captação.

Com a intensificação da seca, a descarga fluvial foi reduzida para valores de 3 a 2 m^3/s entre o final de abril e início de maio/2016, a qual se manteve baixa até meados de novembro/2016 (Fig. 4B), o que permitiu o progressivo avanço da IS entre as campanhas de monitoramento. Assim, na segunda campanha, realizada em maio/2016, foi possível verificar que a frente da intrusão ultrapassava o local da captação municipal. O período seco de 2016 foi o mais severo entre os anos considerados, apresentando uma redução de 95% frente o valor médio (Tab. 1).

Análises realizadas em 13/04/2016 revelaram o comprometimento da água captada e distribuída a população pela alta concentração de cloreto ($\approx 300 mg/L$), já excedendo o valor máximo permitido (VMP) de 250 mg/L para água potável (Brasil, 2011). Os dados apresentados na figura 5 foram fornecidos pelo SAAE do município. Nos períodos de seca de 2018, 2019 e no início da estação em 2020 a captação era interrompida nos momentos de maré alta para evitar a tomada de água com elevado teor de cloreto, por isso, o gráfico não registra muitos valores superiores ao VMP.

Nas campanhas de junho e agosto/2016 constatou-se que a IS se estendia por mais de 50 km (Fig. 4A). Neste período a água nas proximidades da captação apresentava salinidades de 12 a 18 g/L , o que indica que aproximadamente 50% desta possuía origem marinha. Os teores de cloreto ultrapassaram 10.000 mg/L (Fig. 5) entre o setembro e novembro (11/11/2016), quando chuvas intensas na porção mineira da bacia hidrográfica elevaram a descarga fluvial, o que promoveu a retração da IS rumo à foz, permitindo a captação de água livre de interferência marinha.

A significativa redução da vazão registrada entre o início e final de abril/17 (de 27,7 para 5,6 m^3/s), permitiu o avanço da água marinha e fez com o teor de cloreto voltasse a superar o VMP em 23/04/17 (como também registrado em 13/04/16). Em 26/04/17 teores acima de 3.000 mg/L foram registrados devido a ocorrência da preamar com altura de 2,0 m. Os dados das campanhas de setembro/2017 e outubro/2020 reproduzem os de junho/2016 (Fig. 4A), o que demonstra o caráter cíclico da intrusão e do comprometimento da qualidade do ponto da captação durante os períodos de seca.

Schettini & Truccolo (1999) foram capazes de ajustar uma função entre a descarga fluvial o avanço da intrusão pelo estuário do rio Itajaí-açu. Porém, para o RSM não foi possível estabelecer tal correlação, uma vez que a vazão do rio se manteve baixa e praticamente constante ($Q < 4 m^3/s$) à medida que a intrusão progressivamente avançava pelo estuário, entre as campanhas de monitoramento (Fig. 4A). De modo geral, nos meses de seca verificou-se uma redução gradual da vazão e o lento avanço da IS pelo rio.

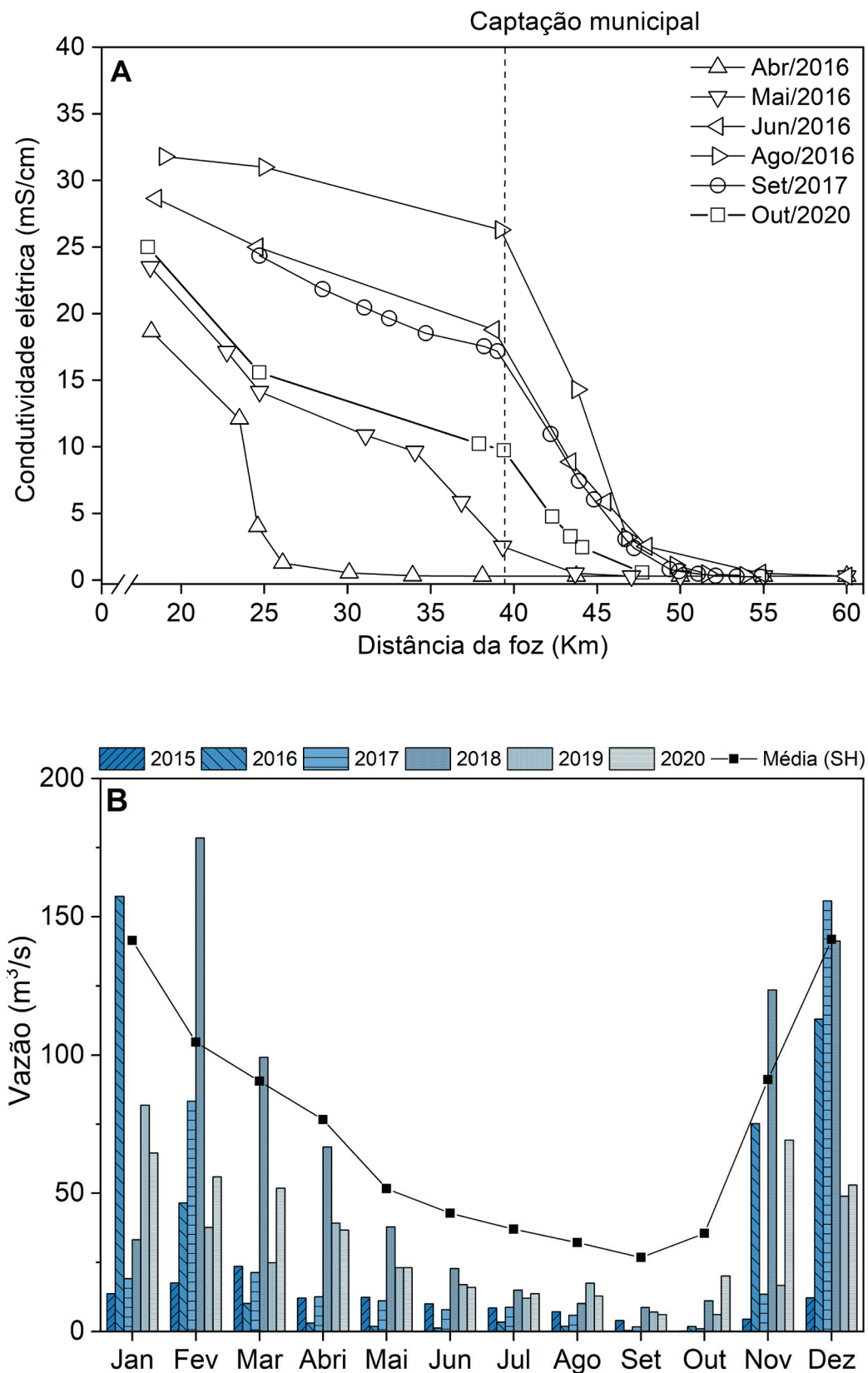


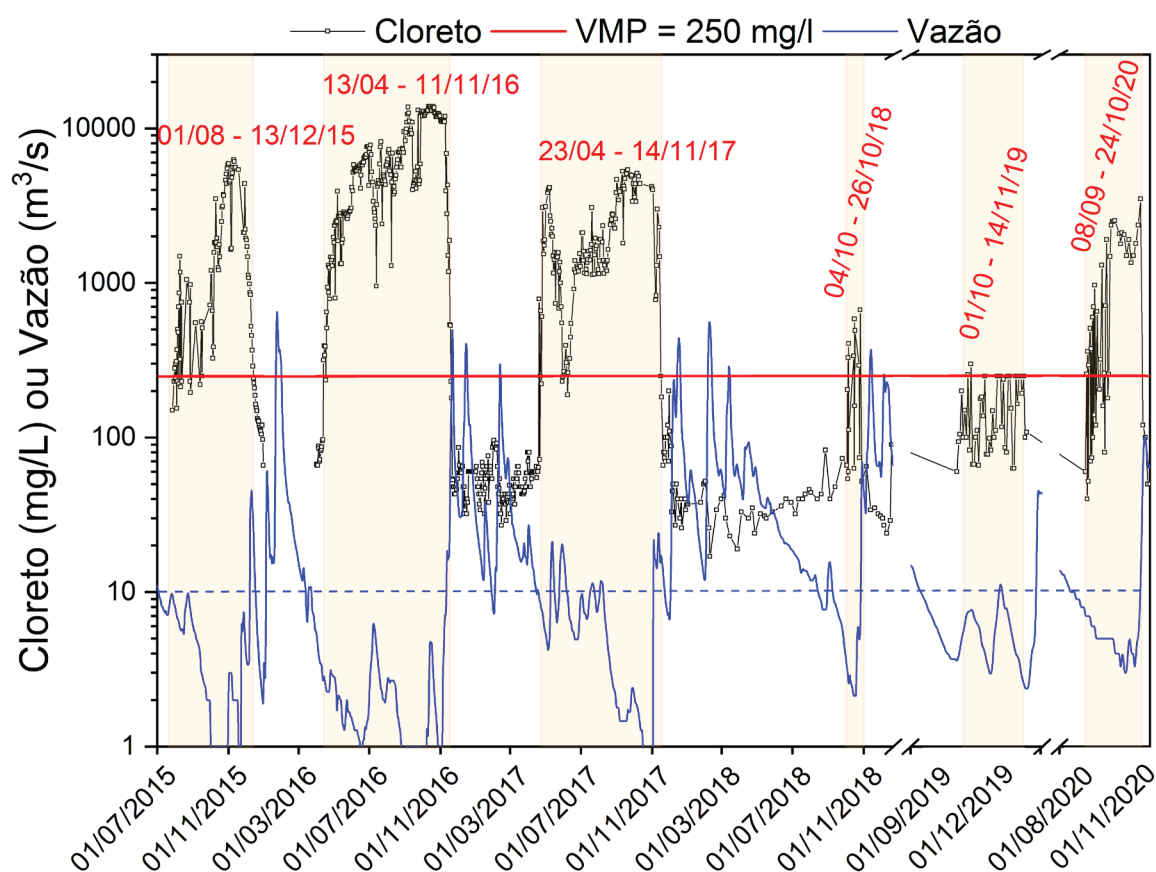
Figura 4. Dados das campanhas de monitoramento da IS. A) Condutividade elétrica média da água ao longo do RSM, registrada durante HWS de preamar. B) Vazão média mensal e média da série histórica (SH) entre 1974-2020 da estação Boca da Vala.

Figure 4. Saline intrusion (IS) monitoring campaign data. A) Average electrical conductivity of water during high water HWS. B) Averages of the monthly river discharge and the historical series (SH), between 1974 and 2020, to Boca da Vala fluviometric station.

Tabela 1. Vazões médias, percentual de redução frente à série histórica e teor médio de cloreto da água captada para abastecimento municipal.

Table 1. Average flows, relative reduction compared to the historical series, and mean chloride content of the water collected for municipal supply.

	Série Histórica	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
$Q_{\text{média}}$ (m ³ /s)	71,4	50,4	10,4	34,7	28,5	62,3	27,7	35,7
Redução (%)		29,4	85,4	51,4	60,1	12,7	61,2	50,0
Período Seco (maio a outubro)								
$Q_{\text{média}}$ (m ³ /s)	37,8	23,5	7,1	1,9	6,1	17,6	13,8	15,3
Redução (%)		38,0	81,2	95,0	84,0	53,4	63,4	59,5
Cloreto (mg/L)*		<100	2.000	6.250	2.200	270	160	1.050

Figura 5. Vazão registrada pela estação Boca da Vala e concentração de cloreto na água captada para abastecimento público no RSM, destacando os períodos com teores de cloreto acima do valor máximo permitido (VMP) de 250 mg/L decorrentes da baixa vazão ($Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$) e intensa salinização.Figure 5. Water flow recorded by Boca da Vala station and chloride concentration in the water abstracted from SMR for public supply, detaching periods with chloride levels above the maximum permissible value (VMP) of 250 mg/L due the low discharge ($Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$) and intense salinization.

Já com a ocorrência de chuvas, a vazão se eleva abruptamente e causa a rápida retração da IS.

Considerando o avanço e a retração da IS registrado entre 2015 e 2020 e, as relações destes eventos com as vazões registradas (Fig. 5), sugere-se que vazões menores que 10 m³/s permitem o avanço da intrusão ao ponto de comprometer a captação municipal de São Mateus, ao passo que, $Q \geq 10$ m³/s seriam suficientes para impedir seu avanço. O valor de $Q = 10$ m³/s equivale a 91,6% da curva de permanência do rio.

Avoine *et al.* (1981) e Sebastian *et al.* (2016) registraram avanços atípicos da água marinha, por 45 a 70 km, nos rios Seine (França) e Meking (Vietnam), respectivamente, durante períodos de seca. Segundo Schettini (2002a, 2002b), nos meses com vazões 50% inferiores à média, a IS estende-se por 33 km no Rio Itajaí-Açu (SC), no qual picos de vazão de 1.000 m³/s são capazes de expulsar toda a água marinha da bacia estuarina. O efeito da regularização da vazão promovida pelo Açude do Castanhão (CE) sobre a intrusão no Rio Jaguaribe é discutido por (Frota, 2013). Segundo D'Aquino *et al.* (2010) a frente da intrusão varia de 11 a 22 km da desembocadura do Rio Araranguá (SC) em função de vazões entre 45 e 25 m³/s. Já no Rio Tubarão (SC) intrusões de até 30 km ocorrem durante a preamar (D'Aquino *et al.*, 2011). Nos estuários aluviais da Malásia a água marinha avança de 20 a 50 km pela calha dos rios, em função da maré e descarga fluvial (Savenije, 2012; Gisen *et al.*, 2015a).

Graas & Savenije (2008) estimam que a manutenção de uma vazão regularizada (Q_{reg}) de 12 m³/s é capaz de conter o avanço da intrusão até a captação municipal instalada a 82 km da foz do rio Pungue (Moçambique), cujas características (profundidade média do estuário de 3,3 m e vazão média 100 m³/s) se assemelham às do RSM. Gens *et al.* (2008) verificaram que uma vazão regular de 11 m³/s (equivalente a 90% da curva de permanência) é suficiente para limitar penetração da IS de sizígia à 36 km no Rio Paraguaçu (BA), cuja vazão média anual (75,8 m³/s) é idêntica à do RSM. Tais equivalências corroboram com a sugestão de que a regularização da vazão do RSM em 10 m³/s seja viável para conter a intrusão e evitar a salinização

da água captada. A facilidade de licenciamento, instalação e operação de pequenos reservatórios para geração hidrelétrica, seu efeito regulatório sobre as vazões e contenção de inundações foi destacado por Paes *et al.* (2019).

Os dados da tabela 1 e figura 4B demonstram que o RSM está sujeito a drásticas reduções de vazão, para valores muito abaixo da média histórica. Provavelmente, isso resulta da combinação entre escassez de chuvas e o alto grau de antropização da bacia hidrográfica. Loss *et al.* (2019) determinaram que mais de 77% da área da bacia hidrográfica está degradada, o que reduz a disponibilidade hídrica da região, e por isso, sugerem ações de reflorestamento como forma de mitigação. O Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) alerta que a bacia está em situação crítica de disponibilidade hídrica, e reconhece a necessidade de recuperação das áreas degradadas como forma de mitigar a erosão e para recuperar a vazão de base dos rios (AGERH, 2018b).

Os mapas de contorno gerados com a interpolação dos perfis de salinidade são apresentados na Figura 6. Durante as campanhas de monitoramento a turbidez variou de 3 a 27 NTU, com menores valores a montante da IS, e os maiores próximo ao fundo. O pH (6,5 a 8,4) se correlaciona com a salinidade, pois a água marinha é mais alcalina que a do rio. A temperatura (23,4 a 30,7 °C) decresceu entre as campanhas ao longo do ano. Nos trechos mais profundos a temperatura da água chega a ser 0,8 °C menor que a do topo. Os valores de OD (2,6 a 9 mg/L), correspondem a saturações de 29 a 100%, com os menores valores nas proximidades da confluência com Rio Abissínia, o qual transporta os efluentes municipais de elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e patógenos (Cotta *et al.*, 2017). Neste trecho, a IS direciona os poluentes no sentido da captação municipal, comprometendo ainda mais a qualidade da água. Os impactos decorrentes do despejo de esgoto são percebidos em muitos rios brasileiros, especialmente a jusante de centros urbanos (Midugno & Roisenberg, 2013; Batista & Gastmans, 2015).

Conforme apresentado na figura 6 a calha do RSM não é plana no trecho estudado, dada

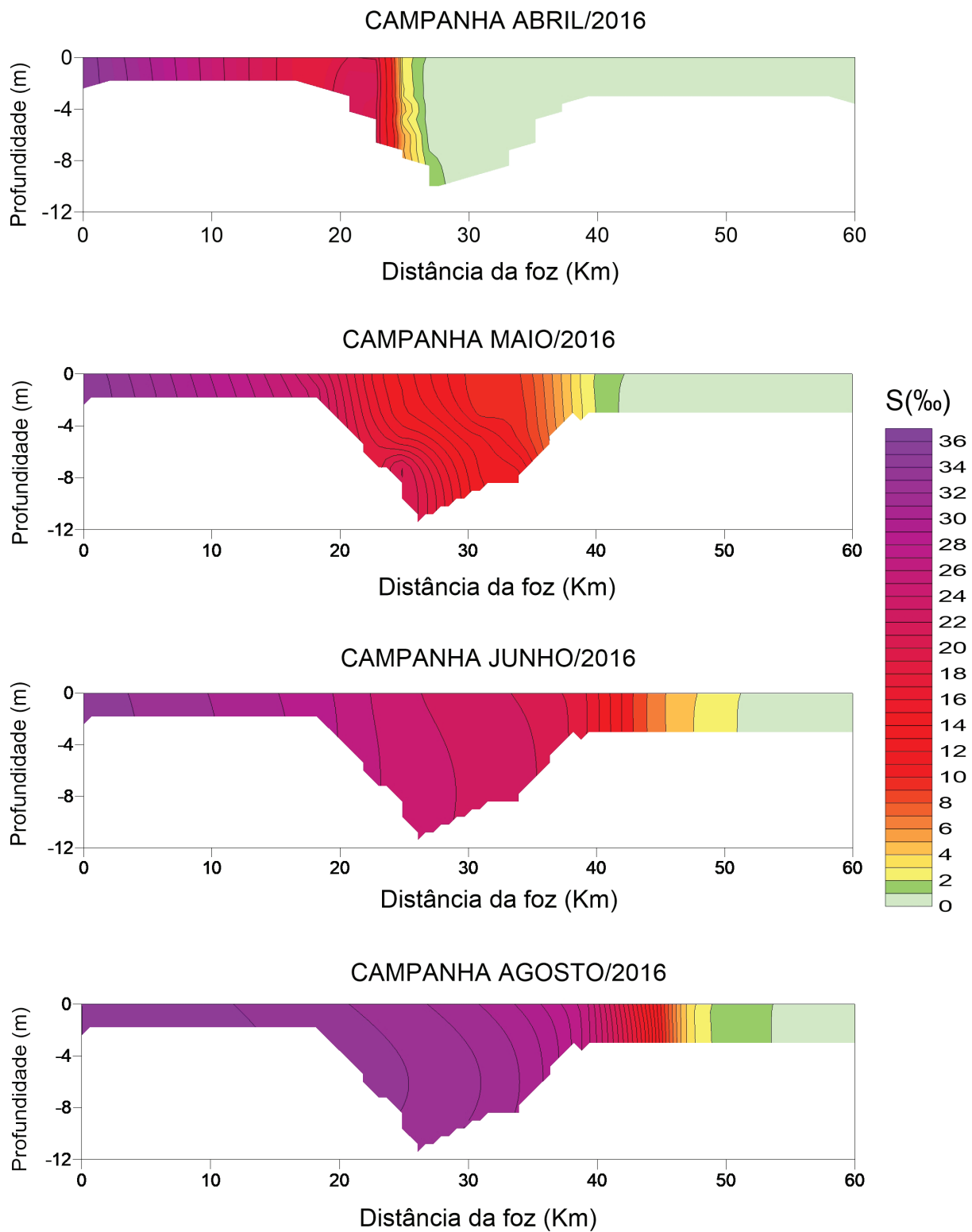


Figura 6. Perfis de salinidade do RSM durante o HWS. Salinidade da foz medida foi apenas na campanha de 2017.
 Figure 6. SMR's salinity profiles during HWS. Salinity at the mouth was measured only in the 2017 campaign.

existência de uma sessão mais profunda entre os quilômetros 20 e 40. Este aprofundamento, corresponde a aprox. 40% do volume total da calha entre a foz e o quilômetro 40, e sua formação provavelmente decorre da confluência com rio Abissínia. O que aumenta a velocidade de escoamento no trecho e por consequente intensifica o transporte de sedimentos e aprofundamento do leito (Schettini, 2002a; Nittrouer *et al.*, 2012). Este processo é mais intenso nos períodos de chuvas, uma vez que a drenagem urbana, na forma de enxurradas, é concentrada no Abissínia.

A IS dobrou de extensão entre as campanhas de abril e agosto de 2016 (Fig. 6). Na primeira, a intrusão estendia-se por 25 km, com rápido decréscimo da salinidade na zona de mistura, já na última a intrusão havia avançado por mais de 53 km com gradual variação ao longo do rio. O que provavelmente se deve a efetiva mistura promovida pela ação das marés durante o período de baixa descarga fluvial. Além disso, foi possível verificar que a partir de maio/2016 a água marinha (mais densa) preenche a cavidade do leito durante o HWS, alterando discretamente o perfil de salinidade.

A estratificação vertical foi avaliada com o parâmetro $n = \Delta SSm$, o qual variou de 0,048 a 0,072 para as medidas realizadas entre 18 e 20 km da foz (trecho das primeiras medidas de cada campanha de monitoramento). Por exemplo, na campanha de 07/04/16 a variação de salinidade entre topo e fundo foi de 10,76 a 11,28 g/kg, com $n = 0,048$. Isto confirma que o estuário do RSM é um sistema bem misturado do tipo I ($n < 0,1$) durante a preamar, e que o avanço da IS pode ser representado com o modelo unidimensional. Segundo Dyer (1997), um estuário bem misturado ocorre quando a descarga de água doce é pequena em comparação com os fluxos de maré, como registrado no período de monitoramento.

3.3 Aplicação do modelo 1-D na representação da IS

Os resultados obtidos com as planilhas eletrônicas utilizadas para representação das características morfológicas e extensão da IS são apresentados nas Figuras 7 e 8. Na primeira

foram inseridos os dados de profundidade e largura do RSM para o cálculo das seções transversais e obtenção das constantes de representação morfológica, conforme Gisen *et al.* (2015a, 2015b).

O modelo pressupõe que o rio tenha profundidade constante, ou que esta varie linearmente na zona de avanço da intrusão (Savenije, 1989). O RSM apresenta profundidade média de 3,8 m, com uma depressão em torno do quilômetro 30, como já discutido, o que interfere na representação morfológica deste trecho (Fig. 7).

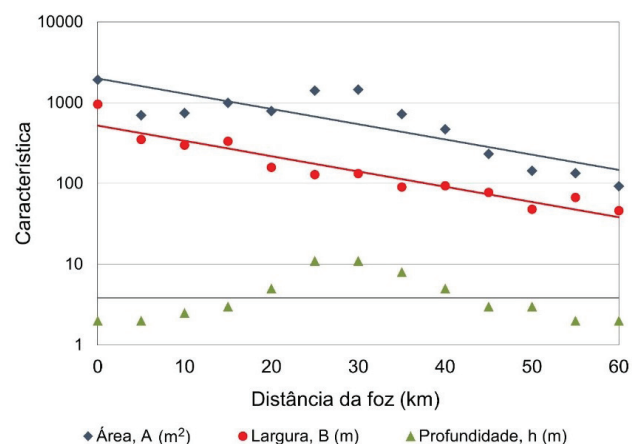


Figura 7. Representação morfológica da calha do RSM no estuário.

Figure 7. Morphological representation of the SMR channel near its mouth.

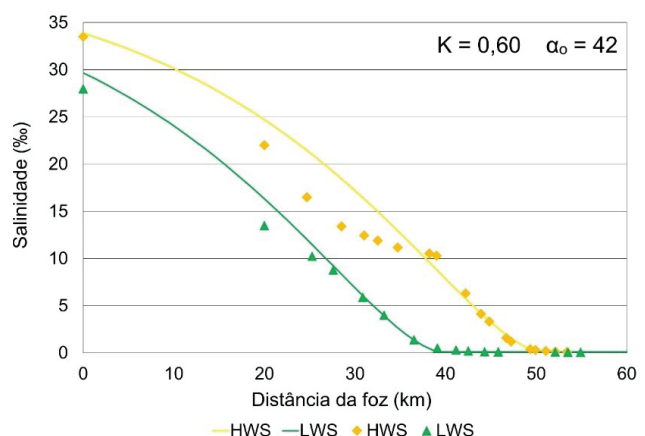


Figura 8. Comparação entre os dados (pontos) e as curvas de distribuição longitudinal da IS durante a estufa de preamar (HWS) e de baixa-mar (LWS) em 21/09/17 (alturas das marés de 1,8 m e 0,1 m).

Figure 8. Comparison between the data (points) and the longitudinal distribution curves of the Salinity Intrusion (SI) during the high tide (HWS) and low tide (LWS) on 9/21/17 (tidal heights of 1.8 m and 0.1 m).

Na sequência, a segunda planilha foi utilizada para ajustar os valores de modo a representar o avanço da IS durante o HWS e LWS. Novamente os maiores desvios ocorreram sobre o trecho mais profundo do rio (Fig. 8). Porém, tanto na frente de intrusão, quanto na foz, verifica-se um bom ajuste do modelo aos dados, com diferenças menores que 5%. Para o HWS e LWS o REQ_{Mn} foi de 23,7 e 10,1%, respectivamente, e equivalem a erros médios (Willmott & Matsuura, 2005), e que não comprometem a utilização do modelo (Gisen *et al.*, 2015b).

A extensão máxima da intrusão varia de mais de 10 km entre o LWS e o HWS (Fig. 8). Em relação a curva do modelo, a salinidade medida entre os quilômetros 20 e 40 é de 10 a 30% inferior à prevista para o HWS. Isso, provavelmente decorre da retenção de parte da água marinha na parte profunda da calha e pela entrada de água doce advinda do rio Abissínia. Para o LWS as diferenças foram menores que 15%.

Ao comparar a vazão média dos rios São Mateus (em setembro/17) e Abissínia (Cotta *et al.*, 2017), respectivamente 1,7 e 0,6 m³/s, percebe-se que a contribuição do Abissínia apesar de pequena é suficiente para diminuir a salinidade do trecho nos meses de seca. O registro de menores salinidades em um trecho do Rio Selangor (Malásia) durante o HWS, devido a descarga de água doce de um afluente, também foi considerado por Gisen *et al.* (2015) para explicar a discrepância entre as salinidades registradas e previstas pelo modelo 1-D.

Com o modelo ajustado foi possível estimar uma descarga média entre o HWS e LWS de 0,7 m³/s para a foz do RSM. A qual é menor que o valor medido pela estação Boca da Vala (1,7 m³/s), pois o registro da estação não considera as perdas por evaporação, a captação de água realizada nos períodos de maré baixa, e nem a ação da maré sobre o escoamento. As contribuições conjuntas dos tributários Preto do Sul, Mariricu e Bamburral são pequenas (< 0,2 m³/s), conforme as equações de regionalização de vazão (Elesbon, 2004; Reis *et al.*, 2006). O valor estimado pelo modelo 1-D confirma a baixa disponibilidade hídrica do RSM, a qual não é suficiente para conter a IS, e assim evitar a salinização da água captada em períodos de baixa vazão.

3.4 Alternativas para mitigação da IS

A instalação de uma nova captação em um local livre da IS, isto é, 15 km a montante da atual. É uma proposta amplamente debatida no município, mas de alto custo R\$ 15 milhões (Folha Vitória, 2017). Esta opção se mostra inviável, dada a baixa disponibilidade hídrica ($Q < 1$ m³/s) do rio em seu baixo curso. A construção de uma barreira subaquática de areia (*sand barrier*), a jusante do ponto da atual captação também foi considerada para contenção da IS. Contudo os resultados deste estudo sugerem que devido ao aprofundamento da calha e ao fato do estuário ser um sistema com águas bem misturadas (tipo I), esta não seria uma solução viável, uma vez que a barreira subaquática atua na retenção da cunha salina e por isso é mais adequada a estuários estratificados, do tipo II e III (McAnally & Pritchard, 1997).

Admitindo-se que a regularização da vazão do RSM em 10 m³/s seja capaz de conter o avanço da intrusão até o ponto da captação (Fig. 5), calculou-se a relação entre o volume do reservatório e a vazão por este regularizada (Tab. 2). Foi considerada uma taxa de evaporação de 3 mm/dia (Cotta *et al.*, 2020), o que para uma área de 21,9 km², correspondente a 2/3 da área total do lago de 32,8 km² (Paiva & Paiva, 2016), implica em perdas de 0,74 m³/s por evaporação.

Um reservatório de $30,3 \times 10^6$ m³ (30,3 hm³) é capaz de prover uma Q_{reg} de 2,9 m³/s, a qual equivale a 5,0% da vazão média ($Q_{média}$), Tabela 2. Já reservatórios de 99,5 e 173 hm³, proveem Q_{reg} de 6,5 e 10,1 m³/s. Um reservatório com volume útil de 173 hm³ é indicado como capaz de prover a vazão regularizada desejada ($Q_{reg} \approx 10$ m³/s).

Na figura 9 é apresentada a simulação do volume deficitário do reservatório de 173 hm³ quando abastecido com as vazões afluentes corrigidas da estação Boca da Vala. Percebe-se que nos 46 anos da série histórica considerada o reservatório teria sido capaz de manter a Q_{reg} necessária (10 m³/s) para conter a IS a jusante do atual ponto da captação municipal. Neste processo, o reservatório teria praticamente esgotado seu volume útil apenas no final do período seco de 2016, o qual foi o mais severo de todo o registro. Adicionalmente, com um

reservatório de 173 hm^3 , apenas 15% da vazão média é regularizada, ou seja, o barramento proveria uma vazão regular nos meses de seca e não anularia os picos de cheias que são importantes para manutenção dos processos sazonais da foz e do ecossistema estuarino (Miranda *et al.*, 2002; Naime, 2012).

Um reservatório de 90 hm^3 (linha pontilhada na figura 9) não teria suprido a mesma Q_{reg} em 2016, mas teria resistido aos períodos secos de 1998, 2015 e 2017. No restante do tempo, o reservatório ainda estaria praticamente cheio, pois as vazões afluentes são maiores que as efluentes.

A representação da área alagada ($32,8 \text{ km}^2$) para cota de inundação de 11,3 m, de modo a gerar um reservatório com 173 hm^3 de volume útil, é apresentada na figura 10. Neste ponto o barramento necessário teria largura de aprox. 1110 m (Fig. 11). O ponto da barragem foi definido ao considerar um local estrito na calha do RSM, que não acarretasse no alagamento da sede de propriedades rurais e que fosse próximo da área urbana do município para que o lago tenha apelo turístico e paisagístico.

Araújo (2014) também utilizou o SisCAH para avaliar a regularização de 50% das vazões médias de 3,5 a $39,6 \text{ m}^3/\text{s}$, em diferentes trechos

Tabela 2. Relação entre vazão regularizada (Q_{reg}) e volume do reservatório
Table 2. Relationship between regularized flow (Q_{reg}) and reservoir volume

	Série Histórica	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
$Q_{\text{média}} (\text{m}^3/\text{s})$	71,4	50,4	10,4	34,7	28,5	62,3	27,7	35,7
Redução (%)		29,4	85,4	51,4	60,1	12,7	61,2	50,0
Período Seco (maio a outubro)								
$Q_{\text{média}} (\text{m}^3/\text{s})$	37,8	23,5	7,1	1,9	6,1	17,6	13,8	15,3
Redução (%)		38,0	81,2	95,0	84,0	53,4	63,4	59,5
Cloreto (mg/L)*		<100	2.000	6.250	2.200	270	160	1.050

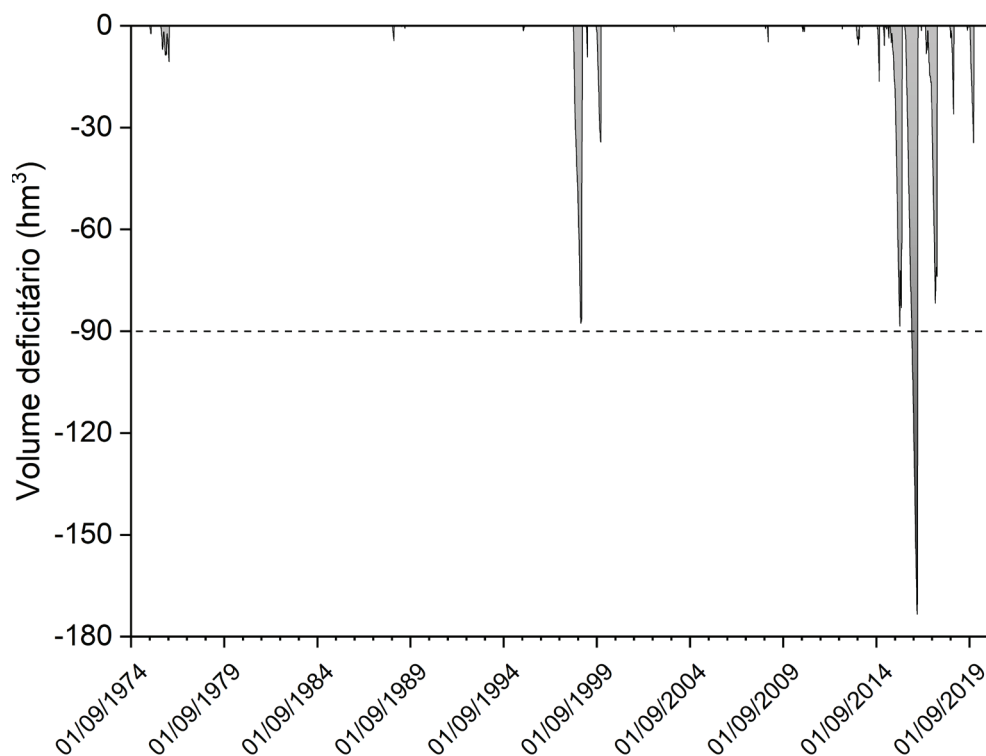


Figura 9. Simulação do volume deficitário de um reservatório de 173 hm^3 ao manter Q_{reg} de $10,1 \text{ m}^3/\text{s}$.
Figure 9. Simulation of the deficit volume of a 173 hm^3 reservoir while providing a Q_{reg} of $10.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

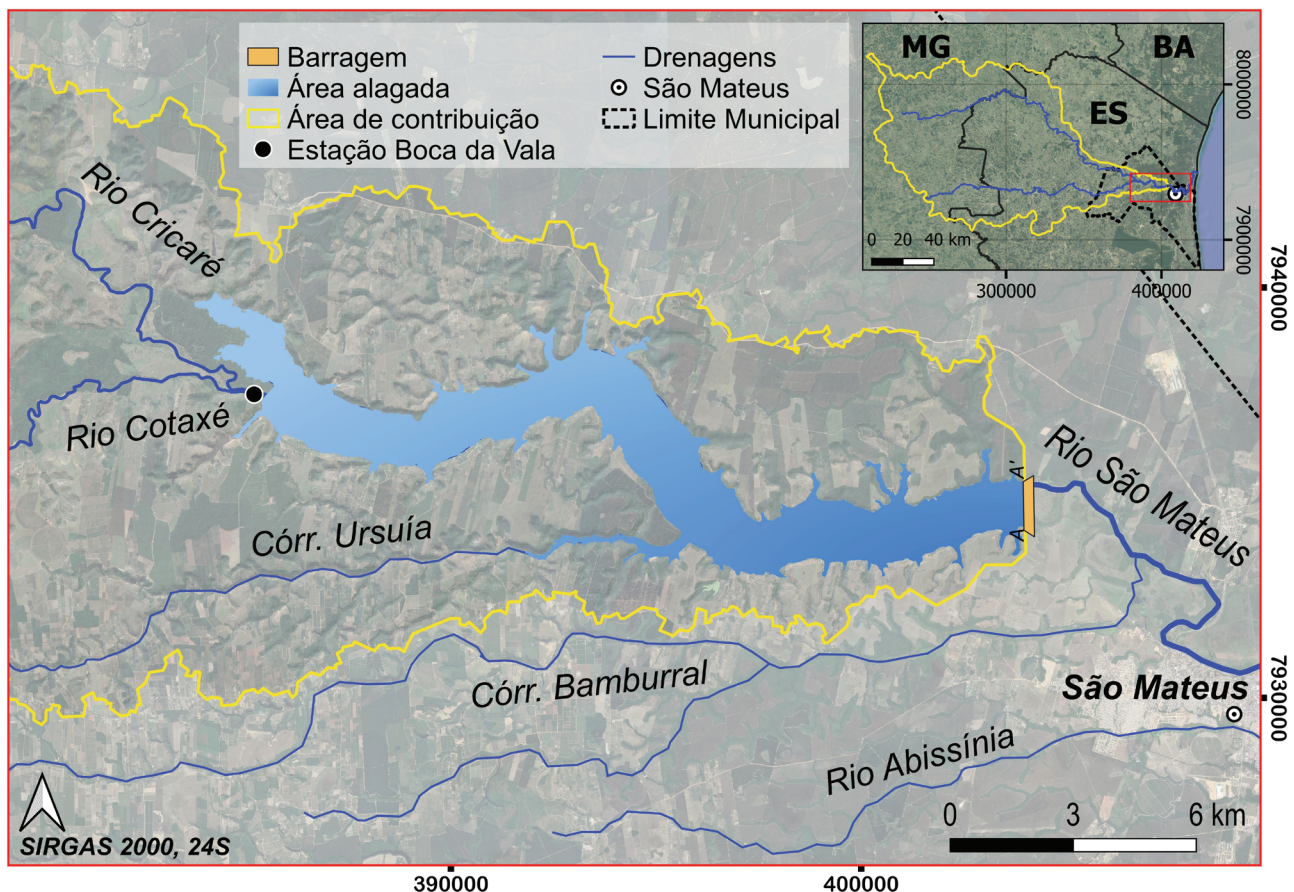


Figura 10. Representação da área alagada por um reservatório de 173 hm³ formado por um barramento de 11,3 m de altura no Rio São Mateus (RSM).

Figure 10. The flooded area's representation by a 173 hm³ reservoir formed by an 11.3 m high dam on the São Mateus River (SMR).

dos Rios Cricaré e Cotaxé, mediante a instalação de reservatórios de 4,7 a 123 hm³. A instalação de 9 reservatórios na Bacia do Rio São Mateus foi recomendada pela consultoria Acquatool (2009). Os maiores de 400 e 1.000 hm³, nos rios Cotaxé e Cricaré, proveriam vazões regularizadas de 12 e 20 m³/s, respectivamente, com o potencial de geração hidrelétrica de 3,1 e 6,4 MW (Acquatool, 2009). Ambos estudos destacaram a necessidade de implantação de infraestrutura para reservação hídrica na bacia afim de amenizar os impactos das estiagens.

A relação entre a área alagada (A) e o volume do reservatório (V), para diferentes cotas de inundação, é apresentada na Figura 12. Os valores de V/A variam de 3,5 a 13,5 entre a cota de 8 e 30 m. A crescente relação V/A indica que a bacia apresenta uma conformação favorável para alocação do reservatório, uma

vez que a capacidade de reservação cresce mais rapidamente do que a área alagada. Por exemplo, a batimetria realizada por Filho *et al.* (2005) revelou que reservatório de Barra Bonita, na bacia do Médio Tietê (SP), apresenta uma baixa relação $V/A \approx 1,1$, independentemente da cota de inundação. Relações de V/A entre 4 e 10 e de aprox. 10 foram estimadas para os açudes Boqueirão (PB) e Bico da Pedra (MG) por Collischonn & Clarke (2016). Na cota máxima de inundação os maiores reservatórios projetados para a bacia do RSM apresentam razão V/A entre 12 e 15 (Acquatool, 2009). Os erros nas estimativas de volume e área alagada, a partir de sensoriamento remoto (com resolução de 20 a 30 m) para reservatórios >60 hm³, geralmente são menores que 10% (Collischonn & Clarke, 2016).

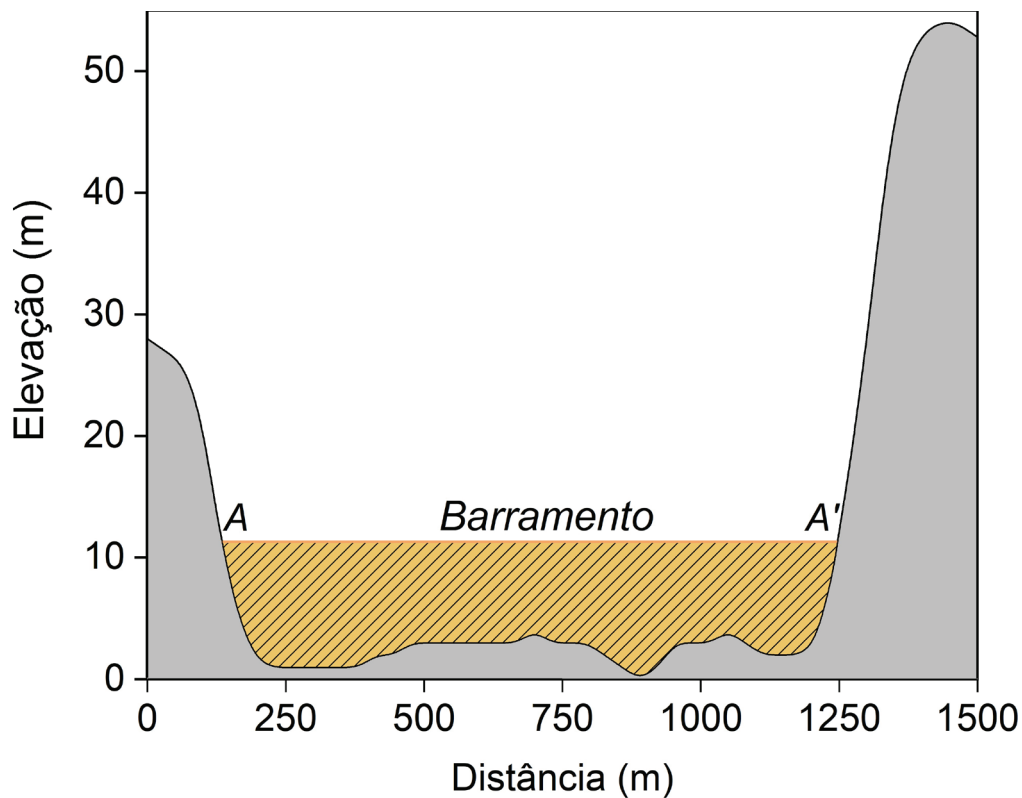


Figura 11. Perfil de elevação do terreno no local do barramento (A até A').

Figure 11. Terrain elevation profile at the dam location (A to A').

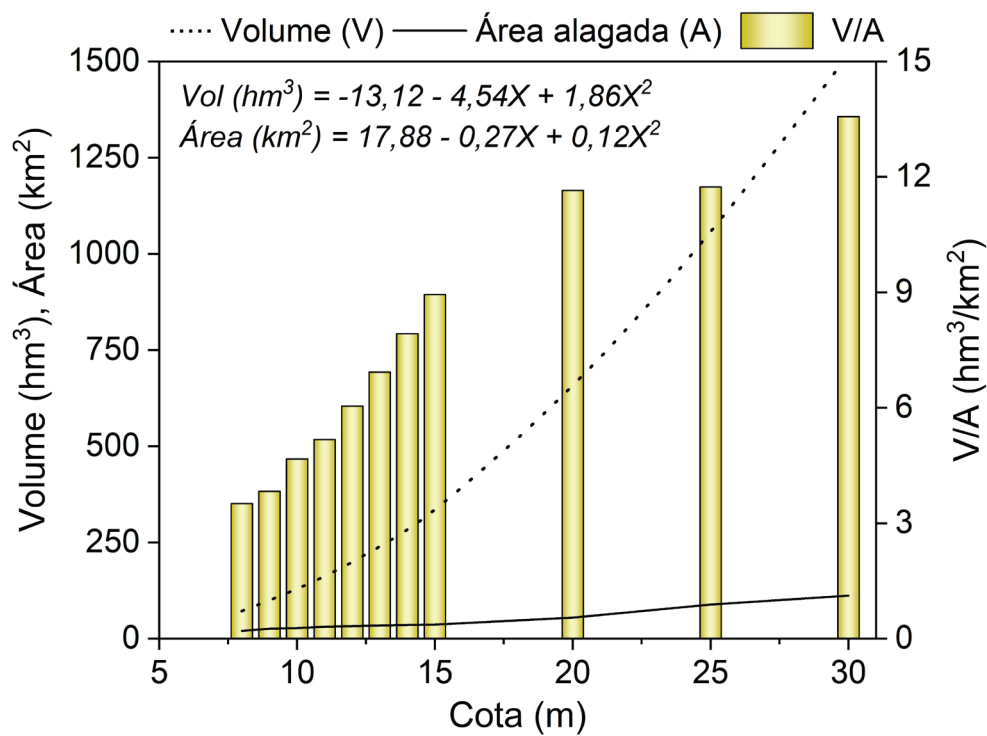


Figura 12. Relação entre o volume do reservatório (V) e área alagada (A), para diferentes cotas (X) de inundação.

Figure 12. Relationship between the volume of the reservoir (V) and the flooded area (A) for different levels (X) of flooding.

A dimensão do projeto para um reservatório de 173 hm³, com barramento de 1,1 km de extensão, é cerca de 10 vezes maior que as dimensões (17 hm³ e 90 m) da Barragem Valter Matielo, construída entre Pinheiros (ES) e Boa Esperança (ES), ao custo total de R\$ 8,3 milhões (ES BRASIL, 2018). Assim, estima-se que o investimento para o projeto de regularização do RSM seja da ordem de 100 milhões de reais, uma vez que apenas o barramento seria de 61 milhões, conforme a função paramétrica para barragens de concreto (FUNCATE, 2007) corrigida pela Índice Nacional de Custo da Construção. Adicionalmente, quando barragens deste porte são instaladas em bacias com picos de cheia superiores a 1.200 m³/s, estas geralmente empregam um sistema com comportas móveis para o controle do volume de armazenamento e para contenção das cheias, o que eleva os custos de instalação e operação (Novak *et al.*, 2007; KL-IGUATEMI, 2014).

A regularização da vazão do RSM com um reservatório de 173 hm³, de modo a garantir uma vazão mínima de 10 m³/s durante os períodos de seca, deve conter o avanço da IS, e assim assegurar o abastecimento municipal com água livre dos efeitos da salinização. Outras vantagens como a proteção contra enchentes, possibilidade de geração hidrelétrica, e a preservação do zoneamento ecológico do estuário devem ser consideradas (Naime, 2012). Contudo a construção do reservatório demanda uma série de estudos geotécnico, hidrológico e sedimentológico aprofundados, além de avaliações de viabilidade financeira e socioambiental, o que está além do escopo desta proposta. Por fim, destaca-se que o PERH reconhece a necessidade de investimentos para construção de reservatórios de regularização de vazões para usos múltiplos (AGERH, 2018b).

Ao considerar exclusivamente o abastecimento público de São Mateus (ES), outra alternativa de menor custo é o barramento do Córrego Bamburral. Apesar deste apresentar grande variação de vazão entre os períodos de seca e chuvas, o córrego possui área de drenagem superior a 100 km², o que segundo a função de regionalização desenvolvida para a bacia do RSM, indica uma vazão média de 0,6

m³/s. Tal disponibilidade hídrica quando sujeita a regularização de 50% supera a demanda municipal de 0,2 m³/s, conforme informações do SAAE. Outros aspectos positivos para o barramento deste curso d'água decorrem da conformação de sua calha (menor largura) e de sua maior proximidade com a sede municipal.

5 Conclusões

Pela primeira vez a IS no RSM foi monitorada, o que revelou que tanto a sua extensão, quanto sua duração, são fortemente influenciadas pela maré e vazão do rio. O estudo permitiu verificar que durante o período de baixa vazão o estuário é um sistema bem misturado (tipo I), e que a IS progride desde o quilômetro 25 até o 50, sem uma correlação precisa com a descarga fluvial. A qual se manteve baixa com reduções de 53 a 95% em relação à média, nos períodos secos de 2015 a 2020. Contudo, percebeu-se que a intrusão é contida a jusante do ponto da captação municipal quando o RSM apresenta vazões ≥ 10 m³/s. O que sugere que a regularização da descarga fluvial, mediante a construção de um reservatório de 173 hm³, deve conter o avanço da IS, e assim evitar a salinização da água captada.

A adoção de um sistema com comportas móveis, apesar do alto custo, é recomendada, pois confere um alto grau de segurança, ao passo que minimiza o impacto sobre a sazonalidade estuarina. A construção do reservatório no RSM irá impulsionar as atividades econômicas em áreas urbanas e rurais devido ao aumento da disponibilidade hídrica. Contudo, o alto custo da obra pode levar a adoção de alternativas mais viáveis para atendimento o abastecimento municipal, como o barramento do Córrego Bamburral.

Restrições impostas pela baixa descarga fluvial em seu baixo curso, pela conformação do leito e baixa estratificação vertical da água, verificadas neste estudo, permitem concluir que a instalação de uma nova captação à montante da frente de avanço da IS ou a construção de barreira subaquática não são viáveis para garantir o abastecimento público.

O modelo 1-D utilizado na representação do

processo de IS revelou a influência da descarga do rio Abissínia e seu efeito sobre a diluição da água marinha, no trecho próximo a confluência. O que compromete adicionalmente a qualidade da água, como evidenciado pela redução dos níveis de OD decorrente do aporte de efluentes domésticos não tratados com alta DBO e patógenos, e reforça ainda mais a necessidade de contenção da IS, a qual direciona os efluentes para a captação.

A gestão dos recursos hídricos é um grande desafio, e a solução de problemas específicos requer a consideração de múltiplos fatores e alternativas. A IS é um fenômeno natural, que é agravado pelo alto grau de degradação da bacia do RSM, o que propicia a ocorrência de períodos com baixas vazões, que terminam por comprometimento do abastecimento público. Um quadro que só poderá ser revertido com a integração de obras de infraestrutura para o provisionamento de água com ações de recuperação de áreas degradadas e de reflorestamento (AGERH, 2018a, 2018b).

Agradecimentos. Ao Corpo de Bombeiros e Secretaria Municipal de Meio Ambiente de São Mateus (ES) pelo apoio com a embarcação e custeio do combustível. Ao SAAE de São Mateus (ES) pelo fornecimento de dados. A Jacqueline I. A. Gisen pelo envio das planilhas eletrônicas para calibração do modelo 1-D, e Carlos Augusto França Schettini (FURG, Rio Grande do Sul) pela revisão do texto. FAPES (Edital 14/2014, TO:0873/2015; Edital 09/2019, TO:034/2020).

Referências

- AGERH. Agência Estadual de Recursos Hídricos. 2018a. *Diagnóstico e o Prognóstico das Condições de Uso da Água na Bacia Hidrográfica do Rio São Mateus*. Vitória, 27p.
- AGERH. Agência Estadual de Recursos Hídricos PERH-ES. 2018b. *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo*, Vitória, 231p.
- AGERH. Agência Estadual de Recursos Hídricos. 2019. *Relatório Etapa B: Enquadramento - Bacia Hidrográfica do Rio São Mateus*. Fonte: *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Mateus*. Vitória, 112p.
- Alber, M. 2002. A Conceptual Model of Estuarine Freshwater Inflow Management. *Estuaries*, 26(6B): 1246-1261.
- Alvalá, R.C., Cunha, A.P., Brito, S.S., Seluchi, M.E., Marengo, J.A., Moraes, O.L. & Carvalho, M.A. 2019. Drought monitoring in the Brazilian Semi-arid region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(Supl. 1), e20170209.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M. & Sparovek G. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6): 711-728
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2010. *Caderno da Região Hidrográfica do Atlântico Leste*. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011024_710.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2013. *SisCoRV 1.0 - Sistema Computacional para Regionalização de Vazões*. Brasília, 104p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2016. *Usos da água do rio São Mateus (ES/MG) estão suspensos*. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/noticias-antigas/usuarios-da-a-gua-do-rio-sapso-mateus-es-mg-estapso.2019-03-15.2510749574>>. Acesso em: 21 out. 2017.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2020. Planilha de Outorgas Emitidas. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/regulacao/principais-servicos/outorgas-emitidas>>. Acesso em: 21 jun. 2020.
- Acquatool. 2009. *Elaboração de estudo tendente a identificação de infraestrutura de reserva hídrica de médio e grande porte na Bacia do Rio São Mateus*. Fortaleza, Acquatool Consultoria, 83p.
- Araújo, J.A.F. 2014. *Avaliação de volumes de regularização para cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio São Mateus*. Vitória, 72p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Avoine, J., Allen, G.P., Nichols, M., Salomon, J.C. & Larssonneur, C. 1981. Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: Effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology. *Marine Geology*, 40(1-2): 119-

- 137.
- Brasil. 2011. Portaria Nº 2.914, 12/12/2011. *Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade*. Ministério da Saúde. Brasília, 16p.
- Batista L.V. & Gastmans, D. 2015. Hidrogeoquímica e qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Jacaré- -Pepira (SP), Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 42(3): 297-311.
- Cai, H., Savenije, H.H.G. & Toffolon, M. 2014. Linking the river to the estuary: influence of river discharge on tidal damping. *Hydrology and Earth System Science*, 18(1): 287-304.
- Cañedo-Argüelles, M., Kefford, B.J., Piscart, C., Prat, N., Schäfer, R.B. & Schulz, C.J. 2013. Salinisation of rivers: An urgent ecological issue. *Environmental Pollution*, 173: 157-167.
- Civita, M. 2012. The "salt wedge" in river estuaries: Overview of the issues. *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, 26: 1-20.
- Collischonn, B. & Clarke, R.T. 2016. Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(4): 719-727.
- Cotta, A.J.B., Duboc, L.F. & Jesus, H.C. 2017. Impacts of urban wastewater and hydrogeochemistry of the São Mateus River, Espírito Santo, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 76: 334-343.
- Cotta, A.J.B., Fachetti, P.S. & Andrade, R.P. 2020. Characteristics and impacts on the groundwater of the Guriri beach resort, São Mateus, ES, Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, 23(1): 10601-10622.
- Dalmas, F.B., Zújar, J.O., Fraile-Jurado, P., Filho, A.C.P., Oliveira, A.P.G., Saad, A.R. & Macedo, A. B. 2020. Modeling of a future scenario of potential sea level rise and consequences to land use in the Cananéia-Iguape Estuarine-Lagoonal Complex (Brazil). *Pesquisas em Geociências*, 47(1): e0876.
- D'Aquino, C.A., Filho, J.P. & Schettini, C.A.F. 2010. Fluvial modulation of hydrodynamics and salt transport in a highly stratified estuary. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(2): 165-175.
- D'Aquino, C.A., Silva, F.L., Couceiro, M.A. & Pereira, M.D. 2011. Transporte de Sal e Hidrodinâmica do Estuário do Rio Tubarão-SC, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3: 113-125.
- Decreto Nº. 8.839. 2017. Decreto Municipal de Nº. 8.839/2017. *Prefeitura Municipal de São Mateus-ES*. Disponível em: https://www.saomateus.es.gov.br/uploads/legislacaoitens/Decretos_2017_9319_-8b3ffde9-da2e-442f-9927-732205ebb01f.pdf. Acesso em: 30 set. 2019.
- Decreto Nº. 11.806. 2020. Decreto Municipal de Nº. 11.806/2020. *Prefeitura Municipal de São Mateus-ES*. Disponível em: https://www.saomateus.es.gov.br/uploads/legislacaoitens/Decre-tos_2020_11806_-ojse9cz5qdp7kygv20lr4mfn3auhxiwtb681.pdf. Acesso em: 26 mar. 2021.
- Dyer, K. 1997. *Estuaries: a physical introduction*. 2ª ed. Chichester, John Wiley and Sons/Wiley & Sons, 210p.
- Elesbon, A.A. 2004. *Utilização de sistemas de informação geográfica na regionalização de vazões-estudo de caso: bacias dos rios Mucuri, Itaúnas e São Mateus*. Vitória, 129p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Elesbon, A.A., Guedes, H.A., Silva, D.D. & Oliveira, I.D. 2011. Uso de dados SRTM e plataforma SIG na caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Braço Norte do Rio São Mateus - Brasil. *Revista Escola de Minas*, 64(3): 281-288.
- ES BRASIL. 2018. Maior barragem do ES é inaugurada no Norte capixaba. Disponível em: <https://esbrasil.com.br/maior-barragem-inaugurada-no-es/>. Acesso em: 05 mar. 2020.
- Espírito Santo. 2014. *Lei Nº 10.179. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo – SIGERH/ES e dá outras providências*. Disponível em: <https://agerh.es.gov.br/legislacao-cerh>. Acesso em: 10 out. 2019
- Fagerburg, T.L. & Alexander, M.P. 1994. Underwater Sill Construction for Mitigating Salt Wedge Migration on the Lower Mississippi River (AD-

- A282 894). Washington, DC: US Army Corps of Engineers. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a282894.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2020.
- Favero, D., Cotta, A.J.B., Bonomo, R. & Rodrigues, M.B. 2021. Hydrogeochemical characterization and suitability of water for irrigation in new and old reservoirs in northern Espírito Santo, Brazil. *Environment, Development and Sustainability*. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-021-01435-8>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- Filho, C.R.R.C., Albertin, L.L. & Mauad, F.F. 2005. Determinação dos polinômios cota x área x volume utilizando a sonda Acoustic Doppler Profiler (ADP) no reservatório de Barra Bonita – SP. *Minerva*, 2(1): 79-90.
- Folha Vitória. 2017. São Mateus terá novo local para captação de água do Rio Cricaré. Disponível em: <<https://www.folhavitoria.com.br/geral/noticia/04/2017/sao-mateus-tera-novo-local-para-captacao-de-agua-do-rio-cricare>>. Acesso em: 17 mar. 2020.
- Fonseca, S.L., Magalhaes, A.A. & Campos, V.P. 2020. Effect of the reduction of the outflow restriction discharge from the Xingó dam in water salinity in the lower stretch of the São Francisco River. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25(e4): 1-16.
- Frota, F.F., Paiva, B.P. & Schettini, C.A.F. 2013. Intratidal variation of stratification in a semi-arid estuary under the impact of flow regulation. *Brazilian Journal of Oceanography*, 61(1): 23-33.
- FUNCATE. Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais. 2007. *Atualização e detalhamento do cálculo do custo da água bruta disponibilizada por reservatórios localizados no nordeste setentrional*. São José dos Campos, FUNCATE, 185p.
- Galeano, E.A., Maso, L.J. & Santana, A. D. 2016. Estimativa de perdas na produção agrícola capixaba em 2015. *Incaper em Revisa*, 6: 26-41.
- Genz, F., Lessa, G.C. & Cirano, M. 2008. Vazão Mínima para Estuários: Um Estudo de Caso no Rio Paraguaçu/BA. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 13(3): 73-82.
- Gisen, J.I., Savenije, H.H. & Nijzink, R.C. 2015a. Revised predictive equations for salt intrusion modelling in estuaries. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1): 2791-2803.
- Gisen, J.I., Savenije, H.H., Nijzink, R.C. & Wahab, A.K. 2015b. Testing a 1-D analytical salt intrusion model and its predictive equations in Malaysian estuaries. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1): 156-172.
- Golden Software. 1995. *Surfer TM for Windows V6*. Reference manual. Colorado, USA.
- Google. 2016. Google Earth software Disponível em: <<https://earth.google.com/web>>. Acesso em: 01 maio 2020.
- Graas, S. & Savenije, H.H. 2008. Salt intrusion in the Pungue estuary, Mozambique: effect of sand banks as a natural temporary salt intrusion barrier. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 5: 2523-2542.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2018. Sea invades mouth of São Francisco River. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/en/agencia-news/2184-news-agency/news/23362-sea-invades-mouth-of-sao-francisco-river>. Acesso em: 12 jan. 2019.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. São Mateus. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/es/sao-mateus/panorama>>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- Ippen, A.T. & Harleman, D.R. 1961. One-dimensional analysis of salinity intrusion in estuaries. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA081411.pdf>>. Acesso em: 09 jun. 2019.
- KL-IGUATEMI. 2014. *Relatório De Impacto Ambiental (RIMA)*. Consórcio: KL - Serviços de Engenharia S.A. e IGUATEMI - Consultoria e Serviços de Engenharia Ltda. Santa Catarina-SC, Brasil, 44p.
- Loss, J.B., Garcia, D.M.N., Sartório, M.V.O., Brandão, F.D. & Jabor, P.M. 2019. Mapeamento de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio São Mateus-ES. In: Gonçalves, P.M. & Jabor F. D. (Ed.). *Coletânea de artigos científicos dos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas do ES*. Vitória, Agência Estadual de Recursos Hídricos, p. 174-187.
- Manique, G.A., D'Aquino, C.A. & Schettini, C.A.F. 2011. Transporte de sedimentos

- em suspensão em um estuário altamente estratificado sob condições de descarga fluvial transiente. *Pesquisas em Geociências*, 38(3): 225-234.
- Marengo, J.A., Torres, R.R. & Alves, L.M. 2017. Drought in Northeast Brazil-past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129: 1189-1200.
- McAnally, W.H. & Pritchard, D.W. 1997. Salinity control in Mississippi river under drought flows. *Journal of Waterway, Port, Coast and Ocean Engineering*, 123(1): 34-40.
- Medeiros, J.P. 2016. *Influência da salinidade na dispersão, diversidade de peixes e na pesca no estuário do rio Apodi/Mossoró (RN)*. Natal, 38p. Monografia de conclusão de curso, Curso de Geografia, Departamento de geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Midugno, R. & Roisenberg, A. 2013. Hidrogeoquímica de cursos de água: influência da ocupação humana sobre parâmetros físico-químicos no Município de Porto Alegre, RS. *Pesquisas em Geociências*, 40(1): 51-60.
- Mikhailov, V.N. & Mikhailova, M.V. 2012. Tides and storm surges in the Thame River Estuary. *Water Resources*, 39(4): 351-365.
- Mikhailova, M. V. 2013. Processes of seawater intrusion into river mouths. *Water Resources*, 40(5): 483-498.
- Miranda, L.B., Castro, B.M. & Kjerfve, B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. São Paulo-SP. Editora da Universidade de São Paulo, 432p.
- Molisani, M.M., Cruz, A.L. & Maia, L.P. 2006. Estimativa da descarga fluvial para os estuários do estado do Ceará, Brasil. *Arquivos da Ciência do Mar*, 39: 53-60.
- Naime, R. 2012. Impactos socioambientais de hidrelétricas e reservatórios nas bacias hidrográficas brasileiras. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 7(7): 1409-1422.
- Nittrouer, J.A., Shaw, J., Lamb, M.P. & Mohrig, D. 2012. Spatial and temporal trends for water-flow velocity and bed-material sediment transport in the lower Mississippi River. *Geological Society of America Bulletin*, 124(3-4): 400-414.
- Novais, R.R., Sartório, M.V.O., Puppim, L.G., Loss, J.B. & Brandão, F.D. 2019. Quantificação do consumo de água pelo setor agropecuário e sua influência no balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio São Mateus-ES. In: Gonçalves, P.M. & Jabor F. D. (Ed.). *Coletânea de artigos científicos dos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas do ES*. Vitória, Agência Estadual de Recursos Hídricos, p. 81-97.
- Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. & Narayanan R. 2007. *Hydraulic Structures*. 4ª ed., London, Taylor & Francis, 728p.
- Officer, C.B. 1973. *Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters)*. New York, Wiley, 465p.
- Paes, R.P., Costa, V.A. & Fernandes, W.D. 2019. Effects of small hydropower plants in cascade arrangement on the discharge cyclic patterns. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24(33): 1-15.
- Paiva, J.B.D. & Paiva, E.M.C.D. 2016. *Hidrologia Aplicada a Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*. Porto Alegre, ABRH.
- Puppim, L.G., Vaneli, B.P., Moreira, L.L. & Novais, R.R. 2019. Cenário tendencial de comprometimento hídrico na bacia hidrográfica do rio São Mateus-ES. *Revista de Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 8(3): 172-192.
- QGIS Geographic Information System. 2021. Open Source Geospatial Foundation Project. V.3.10.14. Disponível em: < <https://qgis.org/en/site/> >. Acesso em: 28 jun. 2021.
- Ramos, H.E., Silva, B.F., Brito, T.B., Silva, J.G., Pantoja, P.H., Maia, I.F. & Thomaz, L.B. 2016. A estiagem no ano hidrológico 2014-2015 no Espírito Santo. *Incaper em Revista*, 7: 6-25.
- Rede Gazeta. 2017. Aumento de salinização de água compromete abastecimento em São Mateus. Disponível em: <<https://www.gazetaonline.com.br/noticias/norte/2017/04/aumento-de-salinizacao-de-agua-compromete-abastecimento-em-sao-mateus-1014049120.html>>. Acesso em: 07 mai. 2019.
- Reis, J.A.T., Cristo, J.N., Elesbom, A.A.A. & Mendonça, A.S.F. 2006. Regionalização de curvas de permanência de vazão para rios do estado do Espírito Santo. *Revista Capixaba de*

- Ciência e Tecnologia*, 1(2): 28-35.
- Savenije, H.H. 1989. Salt intrusion model for high-water slack, low-water slack, and mean tide on spread sheet. *Journal of Hydrology*, 107(1-4): 9-18.
- Savenije, H.H. 2012. *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. 2ª ed. Delft, Delft University of Technology, 173p.
- Schettini, C.A.F. 2002a. Near bed sediment transport in the Itajaí-Açu River estuary, southern Brazil. *Proceedings in Marine Science*, 5: 499-5121.
- Schettini, C.A.F. 2002b. Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-Açu, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7(1): 123-142.
- Schettini, C.A. & Truccolo, E.C. 1999. Dinâmica da intrusão salina no estuário do rio Itajaí-açu. In: 8º CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR, 1999, Trujillo. Resumos Ampliados, 639-640.
- Sebastian, L.S., Sander, B.O., Simelton, E., Zheng, S., Hoanh, C.T., Tran, N., Buu, C.B., Quyen, C.L. & Ninh, N.D. 2016. *The drought and salinity intrusion in the Mekong River Delta of Vietnam - Assessment report*. Vietnam, 55p.
- Silva, M.A., Bernini, E. & Carmo, T.M. 2005. Características estruturais de bosques de mangue do estuário do rio São Mateus, ES, Brasil. *Acta Botanica Brasílica*, 19(3): 465-471.
- Tabua de Marés. 2016. São Mateus-ES. Disponível em: <https://tabuademares.com/br/espírito-santo/so-mateus#_tabela_mares>. Acesso em: 06 jul. 2020.
- TOPODATA. Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. 2020. Folhas 18S42_ e 18S405. Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>. Acesso em: 01 jan. 2018.
- Tormentino, H., Pruski, F.F., Bof, L.H., Cecon, P.R. & Sousa, J.R. 2009. *SisCaH 1.0 - Sistema Computacional para Análises Hidrológicas*. Viçosa, 60p.
- Tucci, C.E. 2012. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4ª ed., Porto Alegre, ABRH-UFRGS, 944p.
- Uliana, E.M., Mendes, M.A., Almeida, F.T., Reis, E.F., Xavier, A.C. & Silva, J.G. 2017. Índice de precipitação padronizado: estudo de caso para região noroeste do Estado do Espírito Santo, Brasil *Pesquisas Agrárias e Ambientais*, 5(5): 330-336.
- Vale, C.C. & Ross, J.L. 2011. As transformações morfológicas e fitogeográficas do estuário do Rio São Mateus, litoral norte do estado do Espírito Santo, entre 1970 e 2008. *Revista do Departamento de Geografia-USP*, 21: 3-23.
- Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., & Barry, D.A. 2013. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51: 3-26.
- Willmott, C.J. & Matsuura, K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79-82.
- WRI. World Resources Institute. 2003. *Watersheds of the World*. Washington, IUCN/IWMI/ RCB/ WRI, 1 CD-ROM.
- Xavier, A. C., King, C. W., & Scanlon, B. R. (2015). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal of Climatology*, 36(6): 2644-2659.
- Xu, Z., Ma, J. & Hu, Y. 2019. Saltwater intrusion function and preliminary application in the Yangtze River Estuary, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1: 118-136.
- Yobbi, D.K. & Knochenmus, L.A. 1989. *Effects of river discharge and high-tide stage on salinity intrusion in the Weeki Wachee, Crystal, and Withlacoochee River Estuaries, southwest Florida*. Water-Resources Investigations Report 88-4116. Tallahassee, 68p.
- Zyryanov, V.N., Chebanova, M.K. & Filatov, N.N. 2015. Seawater Intrusion into River Mouths. *Water Resources*, 42(5): 616-626.